

Impacto del cambio climático en la idoneidad de hábitat de orégano (*Lippia graveolens* Kunth) en México

Climate change impact on the habitat suitability of oregano (*Lippia graveolens* Kunth) in Mexico

Aldo Rafael Martínez-Sifuentes^{1*}, Hilario Macías-Rodríguez¹, Jesús Arcadio Muñoz-Villalobos¹, José Alberto Urrieta-Velázquez¹, Julián Cerano-Paredes¹.

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. Margen Derecho Canal del Sacramento km. 6.5, Zona Industrial 4ª Etapa, C.P. 35140, Gómez Palacio, Durango, México.

*Autor para correspondencia: martinez.aldo@inifap.gob.mx

RESUMEN

Los recursos forestales no maderables son de gran importancia para la subsistencia de pobladores que se localizan en las zonas áridas y semiáridas de México, ya que es una fuente económica cuando se realiza el aprovechamiento de estos recursos. *Lippia graveolens* comúnmente llamado como orégano es una especie arbustiva con muchos usos alimenticios y medicinales. El objetivo del presente estudio fue delimitar y estimar la superficie de idoneidad de hábitat del orégano bajo clima actual y los escenarios de cambio climático rcp 4.8 y 8.5 para 2070, y las variables más importantes para su idoneidad. Se descargaron puntos de presencia de orégano y variables climáticas, edáficas y topográficas. Se utilizó el programa MaxEnt para generar los modelos de idoneidad. Se estimaron 75,211.66 km² para clima actual y 236,233.91 km² y 474,485.99 km² para los escenarios rcp 4.5 y 8.5, respectivamente. Las variables más importantes fueron temperatura media anual, fragmentos volumétricos gruesos, temperatura máxima de mes más caliente, precipitación del trimestre más húmedo y precipitación del mes más húmedo. Estudios de idoneidad de hábitat son de vital importancia para el conocimiento geográfico de presencia de las especies en vías de establecer acciones ante condiciones de cambio climático.

Palabras clave: Análisis espacial, Cambio climático, Distribución de especies, MaxEnt.

ABSTRACT

Non-timber forest resources are of great importance for the subsistence of people living in the arid and semi-arid zones of Mexico, because it is an economic source when these resources are harvested. *Lippia graveolens* commonly known as oregano is a shrub species with many food and medicinal uses. The objective of the present study was to delimit and estimate the area of habitat suitability of oregano under current climate and climate change scenarios rcp 4.8 and 8.5 for 2070, and the most important variables for its suitability. Oregano occurrence points and climatic, edaphic and topographic variables were downloaded. The MaxEnt program was used to generate the suitability models. A total of 75,211.66 km² were estimated for the current climate and 236,233.91 km² and 474,485.99 km² for the rcp 4.5 and 8.5 scenarios, respectively. The most important variables were mean annual temperature, coarse volumetric fragments, maximum temperature of hottest month, precipitation of the wettest quarter, and precipitation of the wettest month. Studies of habitat suitability are of vital importance for the geographic knowledge of the presence of the species in order to establish actions in the face of climate change conditions.

Keywords: Spatial analysis, Climate change, Species distribution, MaxEnt.



INTRODUCCIÓN

En las zonas áridas de México que abarcan más del 50% de la superficie del territorio nacional, subsiste una gran variedad de recursos forestales no maderables. Los cuales, son objeto de aprovechamiento por parte de los habitantes de las localidades aledañas a dichos recursos, debido a que representan un ingreso económico. Las especies predominantes en las zonas áridas son las arbustivas y subarbustivas; donde una de estas plantas arbustivas adaptada a las condiciones características del desierto árido es el orégano (*Lippia graveolens* H. B. K.). El orégano se utiliza como condimento para la elaboración de platillos, tanto mexicanos como internacionales, así como para la elaboración de alimentos enlatados y conservas. Esta especie contiene un aceite esencial con importante actividad antioxidante, por lo tanto, es de utilidad en la industria de la preservación de alimentos (Kulicic *et al.*, 2004). El orégano es el nombre común destinado a más de 40 especies de las familias Verbenaceae, Lamiaceae, Compositae y Leguminosae, y los más importantes son el orégano mediterráneo (*Origanum vulgare*) y el orégano mexicano (*L. graveolens*, *L. palmeri*, *L. alba*) (Rzedowski y Calderón, 2002). El orégano es una planta arbustiva aromática de 0.20 a 2 m, presenta tallos leñosos ramificados desde la base, con hojas oblongas o elípticas, sus flores están dispuestas en espigas subglobosas con cuatro estambres (Ocampo *et al.*, 2009).

El conocimiento de la idoneidad de hábitat de especies forestales no maderables, permite distinguir los diferentes patrones ambientales que contribuyen en su establecimiento, lo que favorece la obtención de información importante en actividades de conservación y gestión de recursos genéticos (Hernández-Ruiz *et al.*, 2016). Actualmente, se cuenta con la disponibilidad de herramientas que ayudan a generar escenarios de distribución de especies (Elith *et al.*, 2006). Dichas herramientas consisten en representaciones cartográficas, donde la distribución espacial de una especie es geográficamente explícita, en función a un grupo de variables de carácter continuo o categórico de naturaleza climática, edafológica. El programa MaxEnt es un algoritmo especializado que se ha usado con frecuencia para predecir la idoneidad de hábitat actual y futura de coníferas en México (Manzanilla-Quiriones *et al.*, 2019). Este programa

emplea registros de presencia-ausencia, ha sido ampliamente utilizado para estimar la idoneidad de hábitat de especies de diversos grupos biológicos (Phillips *et al.*, 2006), que han resultado útiles, sobre todo para la elaboración de programas enfocados a conservación y/o restauración ecológica (Martínez-Sifuentes *et al.*, 2020).

En este trabajo se plantearon los siguientes objetivos: i) delimitar y estimar las áreas de idoneidad de hábitat de orégano en México y ii) identificar las variables más importantes con base al clima actual y bajo los escenarios de cambio climático rcp 4.5 y 8.5 para el horizonte 2070.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El presente estudio se limita al área con presencia de orégano en México, delimitada por las coordenadas extremas 16° 0' 00" a 28° 0' 00" de latitud norte, y 88° 0' 00" a 111° 0' 00" de longitud oeste. La superficie es de 1,072,265.77 km² con una elevación desde el nivel del mar hasta los 2,000 msnm. La precipitación va desde los 53 hasta los 660 mm anuales con una temperatura promedio de 20°C (García, 1998).

Registros geográficos de presencia

Los análisis de idoneidad de hábitat se fundamentan en registros geográficos, para este estudio, se utilizaron puntos de presencia de dos bases de datos, i) Global Biodiversity Information Facility (GBIF.org, 2021) y ii) Colección de datos del Herbario Nacional de la UNAM (MEXU, 2019). Se obtuvieron en total 231 registros de orégano, los cuales se depuraron en la plataforma Niche ToolBox de la CONABO (Osorio-Olvera *et al.*, 2019) para eliminar registros duplicados y con una distancia entre puntos menor a 1.0 km. Dicho proceso evita el efecto de autocorrelación espacial (Monterrubio-Rico *et al.*, 2016).

Variables de clima actual y futuro

La información climática se obtuvo de las 19 capas bioclimáticas de la plataforma WorldClim versión 2.1 (Fick y Hijman, 2017) con una resolución espacial de 30 segundos (~1 km²) por pixel. Para el análisis de idoneidad de hábitat a futuro, se utilizó el Modelo de Circulación General (MCG) HadGEM2-ES del proyecto CMIP-5 (Coupled Model Intercomparison



Project Phase 5 2013) (Giorgetta *et al.*, 2013). Se descargaron los escenarios de las variables bioclimáticas para el MCG con las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés) 4.5 y 8.5 para el periodo 2061-2080 (horizonte 2070), con una resolución espacial de 30 segundos (~1 km²) (Tabla 1).

Tabla 1. Variables bioclimáticas de plataforma WorlClim 2.1.

Variable	Descripción
BIO1	Temperatura media anual
BIO2	Rango medio diurno
BIO3	Isotermas
BIO4	Estacionalidad de temperatura
BIO5	Temperatura máxima de mes más caliente
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO7	Rango anual de temperatura
BIO8	Temperatura media del trimestre más húmedo
BIO9	Temperatura media del trimestre más seco
BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido
BIO11	Temperatura media del trimestre más frío
BIO12	Precipitación anual
BIO13	Precipitación del mes más húmedo
BIO14	Precipitación del mes más seco
BIO15	Estacionalidad (Coeficiente de variación)
BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo
BIO17	Precipitación del trimestre más seco
BIO18	Precipitación del trimestre más cálido
BIO19	Precipitación del trimestre más frío

Variables edafológicas y topográficas

Las variables de suelo se obtuvieron de la plataforma SoilGrids con resolución espacial de 250 m por pixel (Batjes *et al.*, 2017). La información constó de las siguientes variables físicas y químicas de tipo continuo, fragmentos volumétricos gruesos (FRA), densidad aparente (DEN), profundidad del suelo (PRO), pH (PH), capacidad de intercambio catiónico

(CIC) y contenido de carbón orgánico (CCO); dichas capas en formato raster, fueron reescaladas a 30 segundos con formato ASCII.

La información topográfica se generó a través del modelo digital de elevación con resolución espacial de 120 m por pixel, el cual se obtuvo del continuo de elevaciones mexicano 3.0 (INEGI, 2013), al igual que la información de suelo, se homologó a 30 segundos por pixel.

Selección de variables y calibración del modelo

El proceso de selección de variables, se desarrolla a través de un Polígono Mínimo Convexo (PMC), el cual representa el área de influencia del hábitat de la especie. Consiste en colocar 10,000 puntos de fondo para obtener la información de cada variable (Fitz *et al.*, 2013). Para efectos de evitar la multicolinealidad entre variables, se generó una matriz de correlación y se eliminaron aquellas con un valor de $r > 0.70$ ($p < 0.05$) (Merow *et al.*, 2013). La calibración del modelo se llevó a cabo con el coeficiente de criterio estandarizado Akaike AICc, el cual reduce la complejidad del modelo mediante las variables del PMC (Warren y Seifert, 2011). La calibración se desarrolló en el software R versión 3.5.3 con la librería ENMeval (R Core Team, 2015, Muscarella *et al.*, 2014).

Modelo de idoneidad de hábitat para clima actual y a futuro

La modelación de idoneidad de hábitat para clima actual se desarrolló con el software MaxEnt versión 3.4.3. (Phillips *et al.*, 2006). Las variables utilizadas después del proceso de depuración fueron temperatura media anual, fragmentos volumétricos gruesos, temperatura mínima del mes más frío, precipitación del trimestre más húmedo, precipitación del mes más húmedo, elevación y precipitación anual. Los parámetros del modelo fueron por replicación por validación cruzada, 1000 iteraciones, salida de tipo logística, 100 réplicas y umbral de convergencia de 0.0001; se utilizaron 75% de los registros para generar el modelo y el resto (25%) para validación.

Para generar los modelos de idoneidad de hábitat bajo escenarios de cambio climático, se transfirieron los parámetros de calibración y los estadísticos de los mejores modelos de clima actual a los escenarios futuros (Morrone y Esclante, 2016). Para determinar las zonas de idoneidad de hábitat, se generó una reclasificación del modelo con los mejores

estadísticos en los umbrales de (bajo, mediano y alto).

Validación de los modelos de idoneidad de hábitat

Los modelos se evaluaron a través de la prueba de área bajo la curva (AUC). Dicha prueba muestra los rangos de 0.0 a 1.0, donde valores de 0.7 a 0.9 lo clasifican como bueno, y valores por encima de 0.9 lo clasifican como excelente (Peterson, 2011). Adicionalmente a la prueba de AUC, se evaluaron los modelos con la prueba ROC parcial bajo los parámetros de 100 réplicas por bootstrap con una omisión del 5% y el estadístico TSS (True Skills Statistics) que considera la sensibilidad y especificidad del modelo.

Contribución de variables

La contribución de las variables más importantes para clima actual y futuro, se evaluaron con la prueba de Jackknife, la cual permite identificar el porcentaje de contribución (Phillips *et al.*, 2006).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelo de idoneidad de hábitat para clima actual de orégano

Los resultados de las 100 réplicas mostraron valores de AUC de 0.801 a 0.811 para el entrenamiento y de 0.705 a 0.810 para validación. El mejor modelo mostro valores AUC de 0.811 y 0.810 para entrenamiento y validación, respectivamente Y UN ROC parcial de 1.96 (desviación estándar 0.01), el TSS fue de 0.85. El área actual de orégano en México se estimó en 75,211.66 km² (Figura 1). Los estados con mayor concentración de idoneidad de hábitat fueron Baja California Sur 21,690.39 km² (28.84%), Coahuila 10,721.24 km² (14.25%), Oaxaca 8,913.43 km² (11.85%), Sonora 7,370.41 km² (9.80%) y Durango 4,498.00 km² (5.98%).

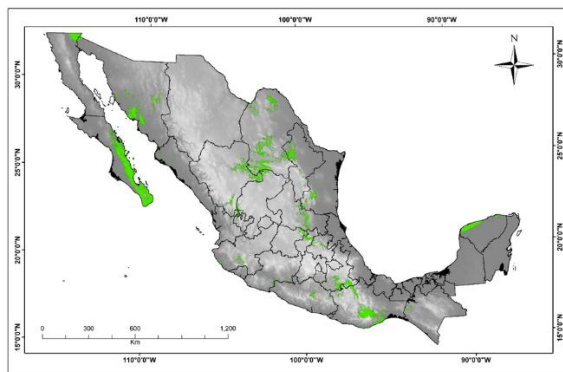


Figura 1. Distribución de idoneidad de hábitat actual de orégano en México (el área verde corresponde a las zonas con orégano).

Modelos de idoneidad de hábitat bajo escenarios de cambio climático

Los valores de AUC para los modelos de cambio climático del MCR HadGEM2-ES bajo los escenarios 4.5 y 8.5, proyectados al horizonte climático 2070 fueron AUC de 0.801 a 0.811 para el entrenamiento y de 0.705 a 0.810 para validación de los modelos. Los valores de TSS para todos los modelos a futuro fueron > 0.80.

Variables relevantes en la idoneidad de hábitat para clima actual y futuro

Las variables más importantes para la idoneidad de hábitat de orégano en México se muestran en la tabla 2.

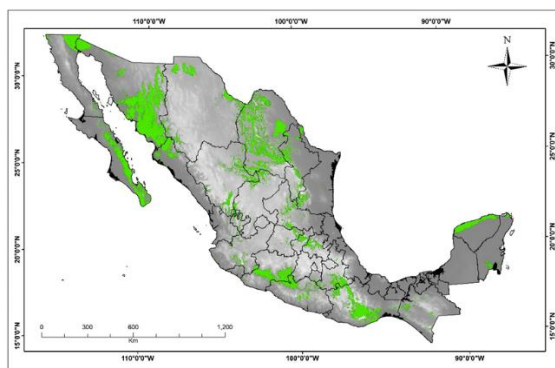
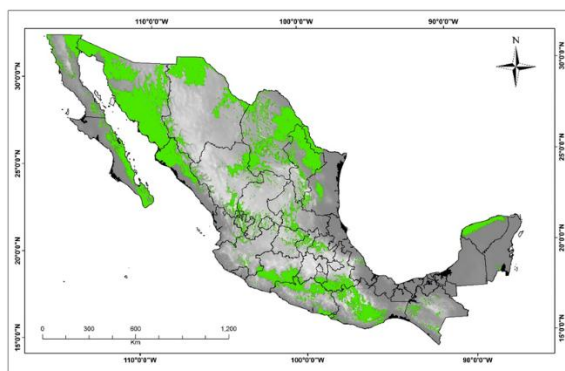
Tabla 2. Variables más importantes para la idoneidad de hábitat de orégano en México.

Modelo	Variables	Contribución total (%)
Clima	Temperatura media anual,	95.9
actual	fragmentos volumétricos	
	gruesos, Temperatura	
	máxima de mes más	
	caliente, Precipitación del	
	trimestre más húmedo,	
	Precipitación del mes más	
	húmedo	
HadGEM2-	Temperatura media anual,	95.9
ES (rcp	fragmentos volumétricos	
4.5) (2070)	gruesos, Temperatura	
	máxima de mes más	
	caliente, Precipitación del	
	trimestre más húmedo,	
	Precipitación del mes más	
	húmedo	
HadGEM2-	Temperatura media anual,	95.9
ES (rcp	fragmentos volumétricos	
8.5) (2070)	gruesos, Temperatura	
	máxima de mes más	
	caliente, Precipitación del	
	trimestre más húmedo,	
	Precipitación del mes más	
	húmedo	

Área futura estimada de orégano en México

El área estimada de orégano en México hacia el horizonte climático 2070 y los escenarios rcp 4.5 y 8.5 fue de 236,233.91 km² y 474,485.99 km², respectivamente (Figura 2 y 3). Para el primer

escenario analizado rcp 4.5, los estados con mayor concentración en idoneidad de hábitat fueron Sonora 63,659.95 km² (26.95%), Coahuila 38,628.03 km² (16.35%), Baja California Sur 19,002.82 km² (8.04%), Oaxaca 18,016.92 km² (7.63%) y Michoacán 11,848.87 km² (5.02%). Por otro lado, para el escenario rcp 8.5, los estados con una mayor superficie fueron Sonora 126,239.57 km² (26.61%), Coahuila 56,276.94 km² (11.86%), Chihuahua 49,155.53 km² (10.36%), Nuevo León 30,601.82 km² (6.45%) y Oaxaca 26,581.87 km² (5.60%).

**Figura 2.** Distribución de idoneidad de hábitat para 2070 bajo escenario rcp 4.5 (el área verde corresponde a las zonas con orégano).**Figura 3.** Distribución de idoneidad de hábitat para 2070 bajo escenario rcp 8.5 (el área verde corresponde a las zonas con orégano).

En México, se han generado estudios para modelar especies forestales en bajo condiciones de clima actual (Martínez-Méndez *et al.*, 2016; Aceves-Rangel *et al.*, 2018; Manzanilla-Quiñones *et al.*, 2019) y para escenarios de cambio climático (Pérez-Miranda *et al.*,



2019; Araiza-Olivares *et al.*, 2020; Martínez-Sifuentes *et al.*, 2020; 2021; 2022).

Estudios previos analizaron la distribución potencial del orégano en México como el de (Quiroz-Velásquez *et al.*, 2016), en donde reportaron una presencia muy alta de orégano para el territorio mexicano, cabe señalar que dicho estudio solamente consideró el ambiente climático, y no otras variables de interés como las edafológicas o topográficas que son de importancia para la modelación espacial con el algoritmo MaxEnt (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016). En el estudio de Quiroz-Velásquez *et al.*, (2016), se encontró una idoneidad con clima actual muy notoria para el centro y sur de México, en contraste a la desarrollada en el presente estudio con presencia en el norte, centro y sur del territorio mexicano. Se reporta una distribución amplia (Martínez-Natarén *et al.*, 2014), ya que está presente en suelos, climas, elevaciones y tipos de vegetación muy variados (Granados-Sánchez *et al.*, 2013).

Estudios anteriores mostraron que la especie de orégano está restringida por la temperatura del mes más cálido con hasta el 19.6% de contribución al modelo, en cambio el modelo obtenido en el estudio muestra que la temperatura máxima del mes más cálido contribuye en 17.2%, muy similar a lo reportado.

Por otro lado, el porcentaje de lluvia de junio representa la contribución más alta en el estudio de Quiroz-Velásquez *et al.*, (2016), con un 24% de contribución, que en este estudio se encontró a la precipitación del trimestre más húmedo con 16.5% de la variabilidad del modelo.

El presente análisis consideró a los fragmentos volumétricos gruesos como una variable de importancia en la idoneidad de hábitat de orégano, esta variable representa el porcentaje de rocas en el suelo (fragmentos > 6 cm de diámetro). En el estudio de Hernández-Herrera *et al.*, (2019), la variable fragmentos volumétricos gruesos representó el 22,3% del total del modelo para la distribución potencial de *Euphorbia antisiphilitica*. El porcentaje máximo de fragmentos gruesos en este estudio fue del 80%, condición favorable para la presencia de orégano, ya que una alta pedregosidad favorece un buen drenaje (Zamora-Martínez *et al.*, 2013). Un alto contenido de piedras conlleva una reducción de la tasa de evaporación del suelo y de la erosión del mismo debido a la fragilidad del perfil superior, además de la extracción completa de la planta de candelilla (Martínez-Ballesté y Mandujano, 2013).

CONCLUSIONES

Estudios espaciales de idoneidad de hábitat de especies, son de vital importancia para establecer estrategias de conservación y aprovechamiento sustentable, más aun, cuando se estudian especies de importancia económica como lo es el orégano en México. Los resultados del presente estudio, permiten ubicar geográficamente las áreas catalogadas como idóneas para la presencia y/o establecimiento de orégano, fundamentado en las condiciones climáticas, edáficas y topográficas para clima actual, y su comportamiento bajo escenarios de cambio climático. Se estimaron 75,211.66 km² para el escenario de clima actual y 236,233.91 km² y 474,485.99 km² como superficie para los escenarios desde el conservador 4.5 hasta el catastrófico 8.5. Es de notar como las condiciones que se prevén a futuro considerando las alteraciones en la variabilidad climática, favorecen las áreas de idoneidad del orégano, situación que permite establecer acciones de conservación bajo la premisa de un aumento en superficie.

LITERATURA CITADA

- Aceves-Rangel, L.D., Méndez-González, J., García-Aranda, M.A. y Nájera-Luna, J.A. (2018). Potential distribution of 20 pine species in Mexico. *Agrociencia* 52: 1043-1057
- Araiza-Olivares, G.A. (2020). Efectos del cambio climático en la distribución de oyamel. *Revista Geográfica de América Central* 65: 263-282. <https://doi.org/10.15359/rgac.65-2.11>
- Batjes, N.H., Ribeiro, E., Oostrum, A.V., Leenaars, J., Hengl, T. y Mendes de Jesus, J. (2017). WoSIS: Providing standardized soil profile data for the world. *Earth System Science Data* 9: 1-14. <https://doi.org/10.5194/essd-9-1-2017>
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Silva, J.T., Bernal-Santana, N., Estrada-Godoy, F. y López-Sandoval, J.A. (2016). Potential distribution model of Pinaceae species under



- climate change scenarios in Michoacán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22 (2): 135-148. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.06.027>
- Elith, J., Graham, C.H., Anderson, R.P., Dudík, M., Ferrier, A., Guisan, A., Hijmans, R.J., Huettmann, F., Leathwick, J.R., Lehmann, A., Li J., Lohmann, L.G., Loiselle, B.A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J.M., Peterson, A.T., Phillips, S.J., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R.E., Soberón, J., Williams, S., Wisz M.S. y Zimmermann, N.E. (2006). Novel methods improve prediction of species distributions from occurrence data. *Ecography* 29: 129-151. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>
- Fick, S.E. y Hijmans, R.J. (2017). WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302-4315.
- Fitz-Maurice, B., Sotomayor, M., Fitz-Maurice, W.A., Hernández, H. y Smith, M. (2013). *Astrophytum Coahuilense* (Bonete de Obispo); Distribución Conocida; Catálogo de Metadatos Geográficos/Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis>. Fecha de consulta 8 de septiembre de 2022
- García, E. (1998). *Isotermas Medias Anuales*. Escala 1:1000000, Aguascalientes, Aguascalientes, México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> Fecha de consulta 11 de Mayo de 2022
- GBIF.org (2021). GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.s6ftex> Fecha de consulta 3 de marzo de 2021.
- Giorgetta, M.A., Jungclaus, J., Reick, C.H., Legutke, S., Bader, J., Böttinger, M., Brovkin, V., Crueger, T., Esch, M., Fieg, K., Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, H.D., Ilyina, T., Kinne, S., Kornblueh, L., Matei, D., Mauritsen, T., Mikolajewicz, U., Mueller, W., Notz, D., Pithan, F., Raddatz, T., Rast, S., Redler, R., Roeckner, E., Schmidt, H., Schnur, R., Segschneider, J., Six, K.D., Stockhause, M., Timmreck, C., Wegner, J., Widmann, H., Wieners, K.H., Claussen, M., Marotzke, J. y Stevens, N. (2013). Climate and carbon cycle changes demo1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5: 572-597. <https://doi.org/10.1002/jame.20038>
- Granados-Sánchez, D., Martínez-Salvador, M., López-Ríos, G.F., Borja-De la Rosa, A. y Rodríguez-Yam, G.A. (2013). Ecología, aprovechamiento y comercialización del orégano (*Lippia graveolens* H. B. K.) en Mapimí, Durango. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, XIX(2): 305-321,
- Hernández-Herrera, J.A., Moreno-Reséndez, A., Valenzuela-Núñez, L.M. y Martínez-Salvador, M. (2019). Modelation of the presence of *Euphorbia antisiphilitica* Zucc with physical and chemical properties of soil. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 6 (18): 499-511. <https://doi.org/10.19136/era.a6n18.1910>
- Hernández-Ruiz, J., Herrera-Cabrera, B.E., Delgado-Alvarado, A., Salazar-Rojas, V.M., Bustamante-González, A., Campos-Contreras, J.E. y Ramírez-Juárez, J. (2016). Distribución potencial y características geográficas de poblaciones silvestres de *Vanilla planifolia* (Orchidaceae) en Oaxaca, México. *Revista de Biología Tropical* 64: 235-246. <https://doi.org/10.15517/rbt.v64i1.17854>
- INEGI. (2013). Modelo digital de elevación de alta resolución LIDAR, tipo terreno, escala 1:250,000. Aguascalientes, Aguascalientes. México. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacion/esmex/> Fecha de consulta 13 de mayo de 2022
- Kulisic, T., Radonic, A., Katalinic, V. y Milos, M. (2004). Use of different methods for testing antioxidative activity of oregano essential oil. *Food Chemistry*, 85(4), 633-640. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.07.024>
- Manzanilla-Quñones, U., Delgado-Valerio, P., Hernández-Ramos, J., Molina-Sánchez, A., García-Magaña, J.J. y Rocha Granados, M. (2019). Similitud del nicho ecológico de



- Pinus montezumae* y *P. pseudostrobus* (Pinaceae) en México: implicaciones para la selección de áreas productoras de semillas y de conservación. *Acta Botánica Mexicana* 126: 1-25.
- Martínez-Ballesté, A. y Mandujano, M.C. (2013). The consequences of harvesting on regeneration of a non-timber wax producing species (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc.) of the Chihuahuan Desert. *Economic Botany* 67: 121-136. <https://doi.org/10.1007/s12231-013-9229-4>
- Martínez-Méndez, N., Aguirre-Planter, E., Eguiarte, L.E. y Jaramillo-Correa, J.P. (2016). Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (Pinaceae) en México: Algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences* 94: 5-24. <https://doi.org/10.17129/botsci.508>
- Martínez-Natarén, D.A. et al. (2014). Genetic diversity and genetic structure in wild populations of Mexican oregano (*Lippia graveolens* H. B. K.) and its relationship with the chemical composition of the essential oil. *Plant Systematics and Evolution*, 300(3): 535-547
- Martínez-Sifuentes, AR., Villanueva-Díaz, J., Manzanilla-Quñones, U., Becerra-López, J.L., Hernández-Herrera, J.A., Estrada-Ávalos, J. y Velázquez-Pérez, A. (2020). Spatial modeling of the ecological niche of *Pinus greggii* Engelm. (Pinaceae): a species conservation proposal in Mexico under climate change scenarios. *iForest* 13: 426-434. <https://doi.org/10.3832/for3491-013>
- Martínez-Sifuentes, AR., Villanueva-Díaz, J., Crisantos-De la Rosa, E. y Stahle, D. (2021). Modelado actual y futuro de la idoneidad de hábitat del ahuehuete (*Taxodium mucronatum* Ten.): una propuesta para conservación en México. *Botanical Sciences* 99(4): 752-770. <https://doi.org/10.17129/botsci.2772>
- Martínez-Sifuentes, A.R., Hernández-Herrera, J.A., Valenzuela-Núñez, L.M., Briceño-Contreras, E.A., Manzanilla-Quñones, U., Gastélum-Arelláñez, A., Trucíos-Caciano, R. y López-Calderón, M.J. (2022). Climate change impact on the habitat suitability of *Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco in Mexico: An approach for its conservation. *Sustainability* 18. <https://doi.org/10.3390/su14148888>
- Merow, C., Smith, M.J., Silander, J.A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography* 36, 1058–1069.
- MEXU. (2019). Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.ib.unam.mx/botanica/herbario>. Fecha de consulta 16 de mayo de 2020
- Monterrubio-Rico, T.C., Charre-Medellín, J.F., Pacheco-Figueroa, C., Arriaga-Weiss, S., Valdez-Leal, J.D., Cancino-Murillo, R., Escalona-Segura, G., Bonilla-Ruiz, C. y Rubio-Rocha, Y. (2016). Distribución potencial histórica y contemporánea de la familia Psittacidae en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 87: 1103-1117. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rmb.2016.06.004>
- Morrone, J.J. y Escalante, T. (2016). Introducción a la Biogeografía, 1st ed.; Universidad Nacional Autónoma de México: México City, Mexico, ISBN 968-36-9463-2.
- Muscarella, R., Galante, P.J., Soley-Guardia, M., Boria, R.A., Kass, J.M., Uriarte, M. y Anderson, R.P. (2014). ENMeval: An R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models. *Met. Ecol. Evol.* 5, 1198–1205.
- Ocampo, V.R., Malda, V., Suárez, R.G. (2009). Biología reproductiva de orégano mexicano (*Lippia graveolens* Kunth) en tres condiciones de aprovechamiento. *Agrociencia*, 43(5), 475–482.
- Osorio-Olvera, L., Vijay, B., Narayani, B., Soberón, J. y Falconi, M. (2019). Ntbox: From getting biodiversity data to evaluating species distributions models in a friendly GUI environment. R package version 0.2.5.4. <https://github.com/luismurao/ntbox>
- Pérez-Miranda, R., Romero-Sánchez, M.E., González-Hernández, A., Rosales-Mata, S., Moreno-Sánchez, F. y Arriola-Padilla, VJ. (2019). Modelado de la distribución actual y bajo cambio climático de pinos piñoneros endémicos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 10: 218-237. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i56.613>



- Quiroz-Velásquez, J.C., Reyes-Lara, M., García-Olivares, J.G., Salazar-Bravo, A., Bazán-Cruz, B.E. y Hernández-Mendoza, J.L. (2016). Factores climáticos, geográficos y fisiográficos que contribuyen a la distribución del orégano (*Lippia* spp.) en México. *Investigación y Ciencia*. 69. 21-25.
- R Core Team. (2015). *A Language and Environment for Statistical Computing*; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>
- Rzedowski, J. y Calderón, G.R. (2002). *Verbenaceae. Flora del Bajío y de regiones adyacentes. Fascículo 100. Pátzcuaro, Michoacán, México: Instituto de Ecología, A. C. Centro Regional del Bajío*
- Warren, D.L. y Seifert, S.N. (2011). Ecological niche modeling in Maxent: The importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecol. App.* 21, 335–342
- Zamora-Martínez, M., Méndez, C., Pérez, R. y Cortés, E. (2013). *Euphorbia antisiphilitica* Zucc.: recurso forestal no maderable de alto valor. Folleto técnico N° 12, CENID-COMEF